

ÁRAMLÁSI EGYENETLENSÉGEK VALÓS IDEJŰ ELEMZÉSE FRÖCCSÖNTŐ SZERSZÁMBAN

REAL TIME ANALYSIS OF FLOW IMBALANCES IN INJECTION MOLDS

TARI GÁBOR¹
SZABÓ FERENC²
SUPLICZ ANDRÁS³

Munkánkban egy újszerű vizsgálati eljárást mutatunk be, amellyel a kis szériás fröccsöntő szerszámbetétek kitöltési folyamatai valós időben elemezhetővé válnak. A mérésekhez egy speciális üvegbetéttel rendelkező szerszámot és nagy sebességű kamerát használtunk fel. A módszer alkalmazhatóságát egy több elágazást tartalmazó elosztócsatornát modellező, additív gyártástechnológiával készített prototípus fröccsöntő szerszámbetét kitöltési folyamatán keresztül vizsgáltuk, majd az eredményeket összehasonlítottuk egy hagyományos eljárással készített acél betéttel.

We present a novel test method suitable for analyzing the filling of small-series injection molds in real time. In the tests, we used a mold with a special glass insert, and a high-speed camera. The applicability of the method was tested through the filling of a prototype injection mold manufactured with an additive manufacturing technology. The mold modeled a runner system with several branches. The results were then compared to the results obtained with a conventional steel mold.

1. BEVEZETÉS

Az új termékek fejlesztésénél kiemelkedő szerepe van a piacra jutás idejének. Ezt az időt leginkább a szimultán gyártmánytervezéssel lehet lerövidíteni. Ennek a módszernek alapelemei az additív gyártástechnológiák (a továbbiakban AM) alkalmazása, legalább prototípusok szintjén. További előnyt jelent, ha a terméket vagy annak szerszámát is gyors eljárásokkal lehet elkészíteni. Az ilyen alkalmazási területeket az irodalomban direkt prototípusgyártásnak, illetve gyors szerszámozásnak nevezik [1, 2].

A gyors szerszámozást eleinte, a szerszámok kis terhelhetősége miatt, korlátozottan alkalmazták. Később, a fémeket feldolgozó prototípusgyártó berendezések megjelenésével egyre nagyobb

mértékben használták ipari célokra. A fém szerszámok segítségével nagyobb szériájú termékeket lehet fröccsönteni, míg a polimer alapú szerszámbetétekkel csak kisebb szériákat lehet készíteni. Manapság már több AM gyártó is kínál olyan nyomtató alapanyagokat, amelyek fröccsöntő szerszámozási célok esetében tartósabbak a korábbi anyagoknál [3].

Fröccsöntési célokra csak azok az AM eljárások alkalmasak, amelyek által készített darabok megfelelő hőállósággal, tömörséggel és szilárdsággal rendelkeznek. A ma elterjedt polimeres eljárások közül főként az SLA (sztereolitográfia) és az InkJet technológiák felelnek meg a fenti követelményeknek. Mind a két eljárás epoxi bázisú gyantákat térhálósit ki valamilyen energiaforrással (lézer, UV lámpa) segítségével. Amíg SLA berendezéseket több gyártó is forgalmaz, addig az InkJet technológiával egy gyártó vált elterjedtté, a Stratasys, amely a technológiáját PolyJet-nek nevezte el [3].

A kis szériás betétekkel foglalkozó kutatások nagy része SLA technológiát alkalmaz. Rahmati és Dickens az SLA-val készült fröccsöntő szerszám élettartamát vizsgálták. Kutatásuk során azt tapasztalták, hogy viszonylag magas darabszám érhető el egy betéttel, ha a fröccsöntési ciklusok előtt 45 °C-ra hűtik vissza azt. A 45 °C-os értéket a nyomtatott gyanták különböző hőmérsékleten végzett mechanikai tesztelésével határozták meg. Továbbá megállapították, hogy a betétek tönkremenetelét a hajlító igénybevételek okozták, függetlenül az ömledékhőmérséklettől [4].

Colton és LeBaut munkájuk során nyomon követték a szerszám- és az alapanyag hőmérséklet változását a fröccsöntés alatt, illetve a ciklusok során. A kutatásukban foglalkoztak a kilökési erők alakulásával a ciklusok alatt. Eredményül kapták, hogy a ciklusok előrehaladtával a szerszámhőmérséklet hirtelen felemelkedik, majd beáll egy magasabb hőmérsékletre, amely a kilökési erők csökkenését eredményezi [5].

¹ hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

³ adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.
suplicz@pt.bme.hu

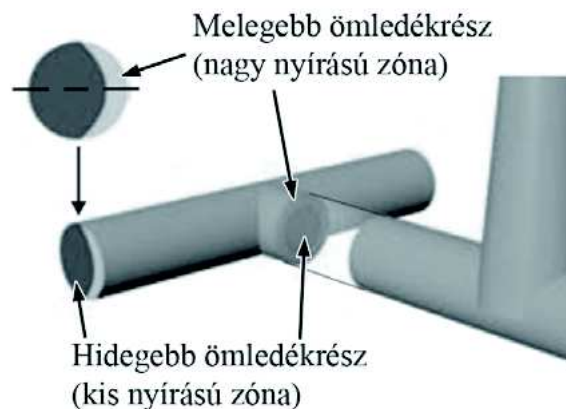
Harris és társai SLA-val készült betéteket hasonlítottak össze alumínium szerszámokkal, így a nagy hővezetés közti különbségek hatására kialakuló zsugorodás különbségeket vizsgálták. A nyomtatott betétben tapasztaltak nagyobb zsugorodásokat, amelyek jelentősebbnek bizonyultak amorf alapanyag esetében. A jelentős eltérések kialakulásában az eltérő hővezetésen túl a szerszám hőtágulása is szerepet játszott a szerzők szerint [6].

Noble és társai optikai célokra gyártottak termékeket PolyJet eljárással előállított fröccsöntő szerszámbetétben és hagyományos megmunkált alumínium betétben. Elemezték továbbá a nyomtatott betétek utólagos megmunkálhatóságát, hogy azok megfeleljenek optikai célokra is. A PolyJet betét alapanyagának a Digital-ABS típust választották, amely a gyártó egyik mechanikailag stabilabb, hőaktartóbb anyaga. A kutatásuk eredményeképpen megállapították, hogy a direkt nyomtatott betétből származó termékek felületi érdessége nem rosszabb, mint a CNC megmunkált alumíniumé. A nyomtatott betét felületi érdességének csökkentésére a szerzők a nyomtató gyantájával történő bevonatolást találták a legmegfelelőbbnek [7].

Kovács és társai PolyJet eljárással készítettek FullCure 720 alapanyagból kísérleti fröccsöntő szerszámbetéteket. Követték az elkészült próbadarabok tömegének alakulását sorozatos fröccsöntés alatt, illetve a szerszámbetét hőmérsékletének alakulását. Megállapították, hogy a prototípus betétben kisebbek a próbadarabok tömegei, mint a referencia alumínium betétben, amelyet az eltérő hőtágulás okozott. A szerzők hasonló eredményt kaptak a betét hőmérsékletének alakulására, mint Colton és LeBaut. A fröccsöntési ciklusok hatására meredeken emelkedik a szerszámhőmérséklet, amelyet a betétek épségének érdekében érdemes lehűteni szabad levegőn 2-3 percig [8].

Volpato és társai vizsgálták a Digital-ABS szerszámbetét célú felhasználhatóságát és összehasonlították referencia acél betétekkel. A kutatók szabványos szakító és hajlító próbatesteket fröccsöntöttek, amelyekkel mechanikai vizsgálatokat végeztek el. A ciklusok alatt figyelték a betétek érdességének változását és a próbatestek méretstabilitását, amelyekben nem tapasztaltak jelentős változásokat. A mechanikai tulajdonságokban sem tapasztaltak nagy eltéréseket, csak az ütőszilárdsága lett jobb a nyomtatott betétben készült termékeknek [9].

Sokan foglalkoztak a nyomtatott betétek alkalmazhatóságával, összehasonlították fém betétekkel, de napjainkig kevésbé kutatott terület a szerszámbetét anyagának hatása a formaüreg kitöltése közben fellépő áramlási egyenetlenségekre. A gyakorlati alkalmazások esetében gazdasági szempontok miatt egy fröccsöntő szerszámban több terméket készítenek el, azaz többfészes szerszámot használnak. Ebben az esetben elkerülhetetlen egy jól kialakított elosztócsatorna megtervezése is. Az elosztócsatornák tervezését megnehezítheti a csatornák fala mentén fellépő intenzív nyíró igénybevétel, amely az áramló alapanyag hőmérsékletét helyileg jelentősen növelheti. Ennek hatására még a kiegyensúlyozott elosztócsatornában is felléphetnek áramlási sebesség különbségek az egyes ágak között, mivel az elosztórendszer elágazásaiban az ömledékhőmérséklet eloszlásának szimmetriája felborul (1. ábra). Így az egyes ágakban kialakuló áramlási sebesség attól is függ, hogy az egyes ágakba a nyírt zónából milyen arányban jut a korábban nagyobb nyírásnak kitett, melegebb ömledékből. Ez a hatás általában jelentősebb, ha több elágazás található az elosztórendszerben.



1. ábra. Aszimmetrikus hőmérséklet eloszlás kialakulása az elosztócsatorna elágazásában [10]

Munkánk célja, hogy bemutassunk egy újszerű mérési eljárást, amellyel kis méretű, kis szériás fröccsöntő szerszámbetétekben lezajló áramlási folyamatok elemezhetővé válnak valós időben. Az eljárás alkalmazhatóságát a sokfészes fröccsöntő szerszámokban fellépő kitöltési egyenetlenségek jelenségén keresztül mutatjuk be, amely visszavezethető az elosztócsatornák geometriai és áramlási sajátosságaira. További célunk, hogy meghatározzuk és összehasonlítsuk az egyenetlenségek mértékét 3D nyomtatott polimer alapú és hagyományos acél szerszámbetétek esetén.

2. FELHASZNÁLT ANYAGOK, BERENDEZÉSEK

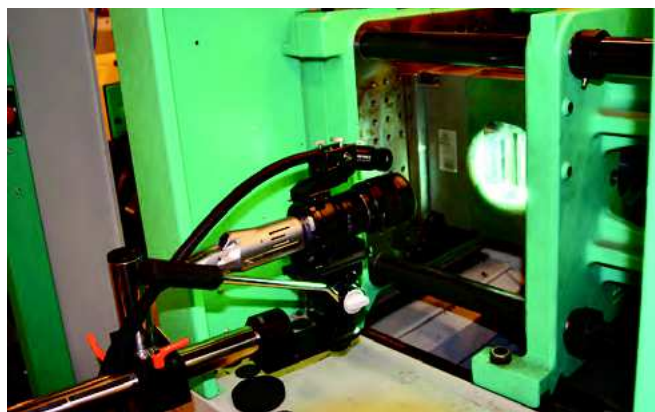
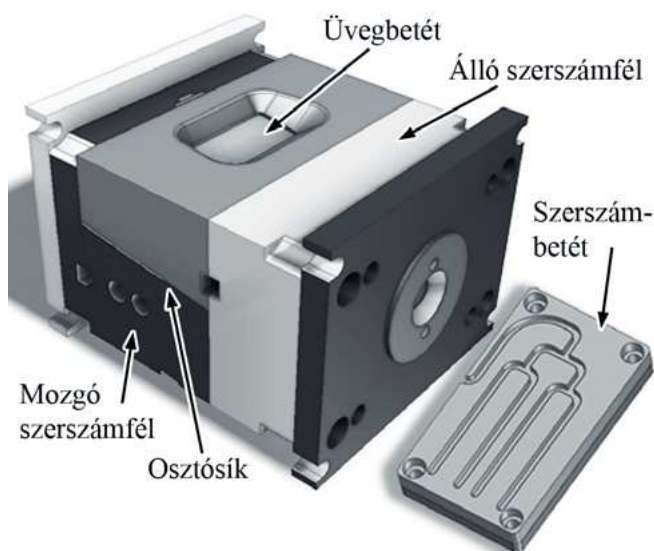
Kísérleteinkhez a Stratasys által forgalmazott Alaris 30-as berendezéssel, FullCure 720 epoxi bázisú fotopolimerből nyomtatott, illetve hagyományos megmunkálási eljárásokkal, C45U szerszámacélból készített szerszámbetéteket alkalmaztunk. A MOL Petrolkémia által gyártott TIPPLEN H 145 F típusú polipropilén homopolimert fröccsöntöttünk Arburg Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő géppel, amely 30 mm átmérőjű nitridált csigával volt felszerelve, a fröccsegység 106 cm³ alapanyagot tud maximálisan befröccsönteni a szerszámba. A kísérletek során csak a kitöltési fázist vizsgáltuk. Ennek figyelembevételével a felhasznált fontosabb feldolgozási paramétereket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Fröccsöntési paraméterek

Technikai paraméterek	Érték
Adagsúly	14 cm ³
Fröccsnyomás korlát	500 bar
Átkapcsolási térfogat	5 cm ³
Utónyomás	0 bar
Záróerő	300 kN

3. KÍSÉRLETI MÓDSZER

A fröccsöntési kísérleteket egy egyedi szerszámban végeztük el, amelynek a különlegessége, hogy formaüregét az egyik oldalról üvegfal határolja (2. ábra). Az üvegbetét segítségével nagy sebességű kamera felhasználásával a kitöltési folyamat valós időben követhető. A szerszám lehetőséget ad az üvegfallal mögötti betét módosítására, ide terveztük meg a kísérleti szerszámbetétet, amely a 2. ábrán látható.



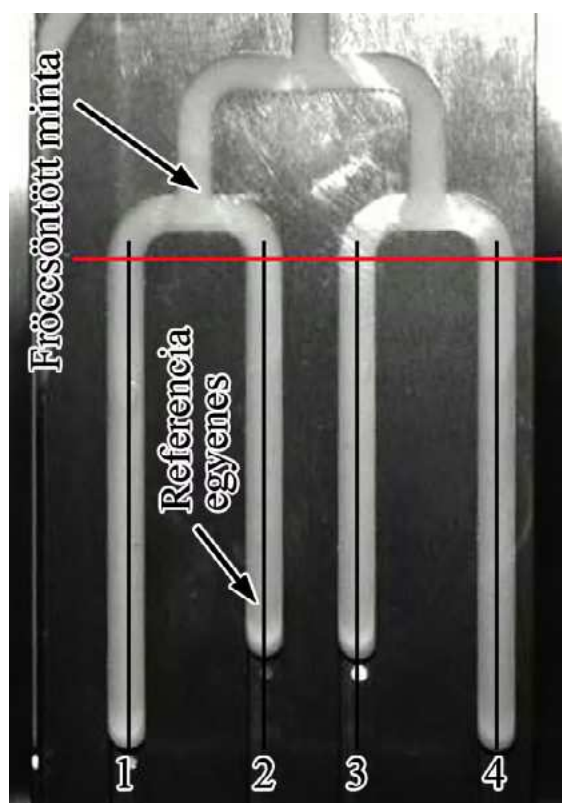
2. ábra. Megtervezett szerszámbetét és mérési elrendezés]

A kialakított termékgeometria a többfészkés szerszámok esetén az elosztócsatornában áramló ömledékben keletkezett, nyírás okozta kitöltési egyenetlenségek vizsgálatára ad lehetőséget. A betétbe nem terveztünk gátat, hiszen azt az elosztócsatornáknak után helyezik el ipari szerszámokban. Az ömledék minden esetben két részre válik szét, így négy egyforma ágban végződik a kitöltés során. Az ágak keresztmetszete 4x4 mm, hosszuk 65 mm. A betétben jól vizsgálható a nyírt zóna hatása, amelynek következtében a szélső ágakban nagyobb áramlási sebesség alakulhat ki. Ezek a sebességben fellépő differenciák eredményezik a 3. ábrán látható ágak közti jelentős hosszkülönbségeket is.

A kitöltési folyamatot egy Keyence VW 9000 típusú, nagy sebességű kamera rendszerrel rögzítettük. A vezérlőhöz egy

VW 600M monokróm kamerát csatlakoztattunk, amelyre egy VW Z5-ös objektívet erősítettünk. A berendezéseket egy mozgatható állványra szereltük, amely lehetőséget adott a kamera közeli elhelyezésére a szerszámhoz. A felvételeket 1000 fps sebességgel készítettük el, 1/3000 s és 1/7000 s zársebesség alkalmazása mellett.

A kamera által rögzített felvételeket a gyártó saját elemző szoftverével, a Motion Analyzer-rel dolgoztuk fel. A program segítségével az ömledékfront középső pontjait le tudtuk követni, amely egy referencia egyenes felvétele után az egyeneshez képest listázza a pontok helyzetét az eltelt idő függvényében. Az adatok felhasználásával kiszámoltuk a sebességi értékeket, amelyekből az első 0,025 s átlagával számoltunk, mint kezdeti sebesség. A 3. ábrán jelöltük a továbbiakban alkalmazott számozást is, illetve az ömledékfront pontjait és azok nyomkövetésének elvét képző referencia egyenest.



3. ábra. Fröccsöntött próbadarab felvétele nagy sebességű kamerával

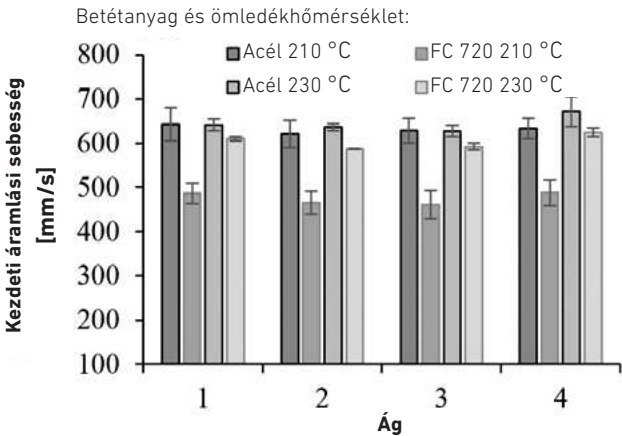
4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

A bemutatott betétekben PP alapanyaggal két különböző hőmérsékleten és három fröccsöntési sebesség mellett végeztük el a vizsgálatokat, beállításonként hármat. Az alkalmazott ömledék hőmérsékletek 210 °C, illetve 230 °C, a fröccsöntési sebességek 10 cm³/s, 45 cm³/s és 80 cm³/s voltak (2. táblázat). A kísérletek során 500 bar nyomáskorlátot állítottunk be a gépen, a szerszám épségének megóvása érdekében. Mivel ezt a nyomáskorlátot egyik beállítás esetében sem értük el, így a mérések eredményei összehasonlíthatók.

2. táblázat. Kísérletterv

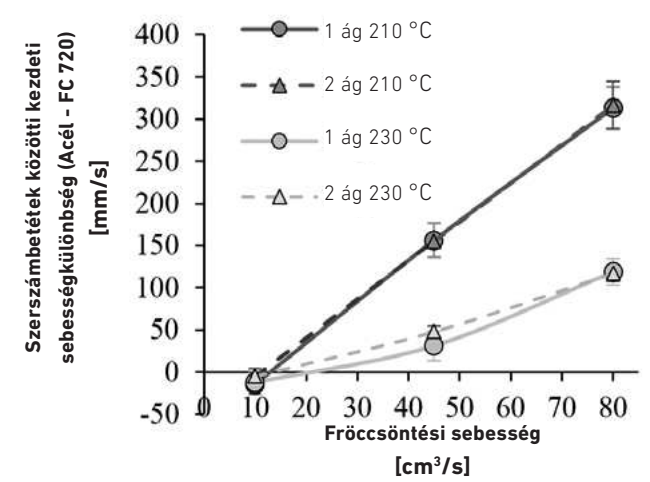
Szerszámbetét anyag	Acél		FC 720	
	Ömledékhőmérséklet			
Fröccssebesség	210 °C	230 °C	210 °C	230 °C
10 cm ³ /s	3 db	3 db	3 db	3 db
45 cm ³ /s	3 db	3 db	3 db	3 db
80 cm ³ /s	3 db	3 db	3 db	3 db

A 4. ábrán a kezdeti áramlási sebességek láthatók a négy ág esetében, 45 cm³/s fröccsöntési sebesség alkalmazása mellett. A kezdeti sebességeket 210 °C-on vizsgálva látható, hogy az acél betétben nagyobb sebességek alakultak ki. Ennek oka vélhetően az, hogy a nagy viszkozitás és az egyre hosszabb folyási út miatt fellépő nyomás növekedés a jelentősen kisebb moduluszú polimer szerszámbetétet lényegesen nagyobb mértékben képes deformálni, mint az acél betétet. A hőmérséklet növelésére a nyomtatott betétben kialakult sebesség megközelítette az acél betét ágakban mérhető kezdeti ömledékáramlási sebességét, mivel a csökkent viszkozitás miatt a fellépő nyomások és az általuk okozott betét deformációk is kisebbek. A betétek között tapasztalt differenciák az összes ágban megjelennek.



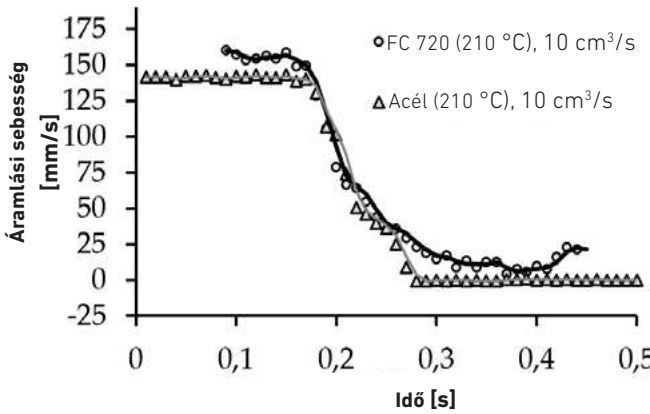
4. ábra. Kezdeti áramlási sebesség 45 cm³/s fröccsöntési sebesség mellett

Az 5. ábra a két különböző betét ugyanazon ágaiban mérhető kezdeti sebességek különbségeit szemlélteti az ömledék-hőmérséklet és a fröccsöntési sebesség függvényében. Amint az látható, kis kitöltési sebességek alkalmazásával mindkét vizsgált hőmérséklet esetén a polimer szerszámbetétnél mérünk nagyobb kezdeti sebességeket, amelynek hátterében vélhetően a lefagyott rétegek vastagságának különbsége és az ömledék kompresszibilitása áll. Az acél szerszámbetét esetében kialakuló vastagabb lefagyott réteg jelentősen csökkenti az átáramlási keresztmetszetet, ezáltal növeli a kitöltéshez szükséges nyomást, amelynek hatására az alapanyag nagyobb mértékben komprimálódik. A sebesség növelésével a különbségek közel lineárisan növekednek az acél szerszámbetét javára a vizsgált sebesség tartományban. Ennek hátterében a korábban már említett betét deformációs különbségek állhatnak.



5. ábra. Az acél és a nyomtatott betétek közti sebességkülönbség a fröccsöntési sebesség és az ömledék-hőmérséklet függvényében

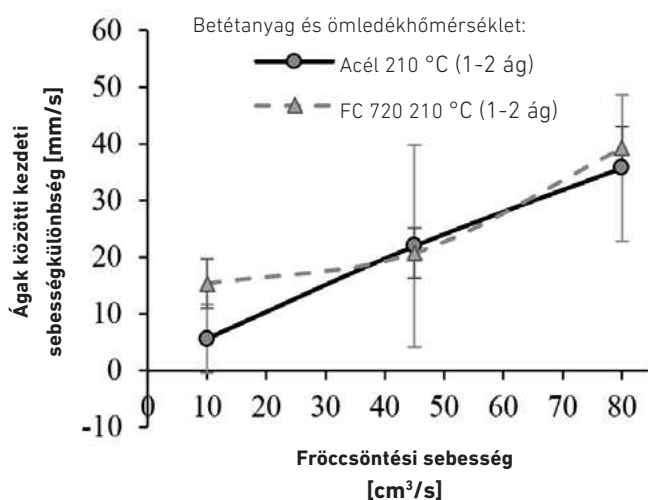
Az egyes ágak kitöltési sebességlefutására az idő függvényében a 6. ábra mutat példát. A kezdeti vízszintes szakasz az ág állandósult kitöltési sebességét jellemzi. Az ezt követő csökkenő szakasz meredeksége és kifutása a csiga lassulásából, valamint a polimer ömledék és a szerszámbetét rugalmas deformációjából adódik. Mivel a fröccsöntési paraméterek a két esetben megegyeztek, így a betétek jelleggörbéi közötti különbségek nagy valószínűséggel a szerszámbetét deformációjának tulajdonítható. A görbe harmadik szakaszában az acél betétben az ömledék megáll, míg a nyomtatott polimer betétben az ömledék újra gyorsulni kezd. Ez a másodlagos áramlás valószínűsítően szintén a deformált szerszámbetét visszaalakulásának köszönhető.



6. ábra. Ömledék áramlási sebessége acél és nyomtatott szerszámbetét 1. csatornájában az idő függvényében

A 7. ábra az 1-es és 2-es ágak közötti ömledék sebesség különbséget szemlélteti a két különböző alapanyagú betét esetében, a fröccsöntési sebesség függvényében 210 °C-on. Jellemzően az 1-es ág lett a gyorsabb, tehát ezekbe a csatornába áramlott a kitöltés során nagyobb nyírásnak kitett, ezáltal melegebb ömledékrész. Az ágak közti sebességkülönbség folyamatosan növekszik a fröccsöntési sebesség növelésével, ami jól mutatja a polimer ömledék nyírásra való érzékenységét. A nyírás

növelésével és ezáltal a belső súrlódás hatására bekövetkezett hőmérséklet növekedéssel az alapanyag viszkozitása lecsökken, így abban az ágban, amelybe a kisebb viszkozitású ömledékrész került kisebb ellenállással, ezáltal gyorsabban haladt a front. A két betétanyag közül jellemzően csak kis kitöltési sebesség esetén tapasztaltunk jelentősebb különbséget, amelyet a nyírt zóna keresztmetszetben elfoglalt pozíciója indokol. Acél szerszámnál az intenzív hőelvonás hatására kis kitöltési sebességek alkalmazása esetén a lefagyott réteg jelentősen meg tud vastagodni, amely hatással lehet az egyes ágakba érkező forró polimer ömledék elosztására, így az ágak közti különbségek csökkenhetnek. Polimer betéteknél a szerszámanyag rossz hőelvonó képessége miatt a lefagyott réteg lényegesen lassabban tud megvastagodni, amely a nyírt zónát az elosztócsatorna falaihoz közelebb tartja, így a felmelegedett polimer ömledék nagyobb eséllyel áramlik a szélső ágakba. Nagyobb fröccsöntési sebességeknél a rendelkezésre álló rövidebb idő miatt a különbségek jelentősen csökkennek.



7. ábra. Ágak közti sebességkülönbség a fröccsöntési sebességek függvényében 210 °C-os ömledékhőmérséklet mellett

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban bemutattunk egy új mérési eljárást, amelyben nagy sebességű kamera és egy speciális üvegbetétes szerszám felhasználásával a polimer ömledékek áramlási jellemzői valós időben elemezhetővé váltak. Az áramlási vizsgálatokat egy többfészkés szerszám több elágazást tartalmazó elosztócsatornájának egyszerűsített konstrukcióján végeztük el 3D nyomtatott polimer alapú és hagyományos acél szerszámbetéten. Méréseink alapján kimutattuk, hogy a két betétanyag esetén jelentős az áramlási sebességek különbsége, ami valószínűsíthetően a polimer betét jelentős mértékű deformálhatóságának és rossz hőelvonó képességének tulajdonítható. A betét hőelvonó képessége a lefagyott réteg vastagságát határozza meg, ami a nyírt zóna keresztmetszetben elfoglalt pozícióját befolyásolja. A bemutatott mérési eljárás ezen felül alkalmas lehet többek között áramlási frontok alakjának, összezapási hibahelyek, valamint szálorientációk kialakulásának elemzésére is.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

Munkánk a Nemzeti Kutatási és Innovációs Hivatal támogatásával az NKFIH Alapból valósult meg, a „Fröccsönthető polipropilén alapú tapadásközvetítő kompozitok fejlesztése járműtechnológiai alkalmazásokhoz” (NVKP_16-1-2016-0038) és az „Egynre szabott orvos-biológiai implantátumok és segédeszközök új generációs gyártási folyamatának kidolgozása additív technológiákra” (NVKP_16-1-2016-0022) projektek keretében. Munkánk az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-2-I és ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság programjának támogatásával készült el. A cikk a Bolyai János Kutatási ösztöndíj támogatásával készült. Köszönjük továbbá az ARBURG HUNGÁRIA KFT.-nek az ARBURG Allrounder 370S 700-290 típusú fröccsöntő gépet, valamint a TOOL-TEMP HUNGÁRIA KFT.-nek, a LENZKES GMBH-nak és a PIOVAN HUNGARY KFT.-nek a kiegészítő berendezéseket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Czvikovszky, T.; Gaál, J.; Nagy, P.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi kiadó, Budapest (2000).
- [2] Kovács, J. G.: Gyors prototípus eljárások I. Az elmélet és annak felülvizsgálata, Műanyag és Gumi, 39/2, 46-50 (2002).
- [3] Levy, G. N.; Schinde, R.; Kruth, J. P.: Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 52, 589-609 (2003).
- [4] Rahmati, S.; Dickens, P.: Rapid tooling analysis of stereolithography injection mould tooling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 740-747 (2007).
- [5] Colton, J. S.; LeBaut, Y.: Thermal effects on stereolithography injection mold inserts, Polymer Engineering & Science, 40, 1360-1368 (2000).
- [6] Harris, R. A.; Newlyn, H. A.; Hague, R. J.; Dickens, P. M.: Part shrinkage anomalies from stereolithography injection mould tooling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43, 879-887 (2003).
- [7] Noble, J.; Walczak, K.; Dornfeld, D.: Rapid tooling injection molded prototypes: a case study in artificial photosynthesis technology, Procedia CIRP, 14, 251-256 (2014).
- [8] Kovács, N. K.; Suplicz, A.; Kovács, J. G.: Gyors prototípusgyártás, mint újszerű fröccsöntő szerszámzási technológia, in 'Műanyag és gumiipari évkönyv 2011' (Szerk. Bagi István) BB Press, Budapest, 45-53 (2011).
- [9] Volpato, N.; Solis, D. M.; Costa, C. A.: An analysis of Digital ABS as a rapid tooling material for polymer injection moulding, International Journal of Materials and Product Technology, 52, 3 16 (2016).
- [10] Beaumont, J. P.: Runner and Gating Design Handbook, Tools for Successful Injection Molding, Hanser Garden Publications Inc. (2004).